УДК 534.5:681:787:621.791

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИВОДА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Ю.Н. Дементьев, С.М. Слободян

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Рассмотрены возможности акустических методов оперативного контроля состояния силовых элементов исполнительных механизмов приводов перемещения. Показано, что методы акустической томографии оценки прочности на стадии "катастрофы" элемента не применимы на начальной стадии развития процесса потери прочности.

Учет влияния ползучести элементов и материалов необходим во многих областях науки и техники, в том числе, электромашиностроении, атомной энергетике и строительной технике. Основания и фундаменты сооружений, исполнительные механизмы компрессоров, нефтяных насосов-качалок, газовых и паровых турбин, элементы конструкций химико-технологических аппаратов работают в условиях значительных перепадов температур и реверсивных нагрузок. Поэтому фактор ползучести материалов в силовых элементах исполнительных механизмов является параметром, определяющим прочность и надежность конструкций [1–4]. В связи с этим весьма актуальным является разработка методов и средств оперативной диагностики и оценки текущего состояния ответственных узлов силовых элементов исполнительных механизмов электроприводов. Особенно важна оперативная диагностика усталости таких элементов, которые испытывают в течение длительного времени предельные динамические нагрузки. Так как в начальные особенно важные моменты развития процессов усталости и ползучести материалов их проявление имеет весьма незначительный (10^{-3}) характер, то для контроля начала развития этих явлений необходимы измерительные средства, обеспечивающие более высокую ($<10^{-4}...10^{-5}$) точность контроля.

Для решения задачи контроля состояния материалов и сред широкое распространение получили ультразвуковые системы различного типа [5, 6], которые позволяют в реальном времени по изменению свойств контролировать состояние материала элемента и при появлении трещин выявлять проявление ползучести и его степень усталости. Контроль текущего состояния "трещиноватости" (конечной стадии усталости) наиболее нагруженного элемента в общей системе технической диагностики электропривода весьма важен для предотвращения аварийных ситуаций, вызванных непредвиденным отказом одного или нескольких узлов исполнительного механизма в условиях реальной эксплуатации.

Непредвиденный отказ, вызванный разрушением элемента исполнительного механизма электропривода, возникает как результат деформации этого элемента во время его эксплуатации. Относительная величина деформации элемента $\delta_{ОТН}$ определяется отношением Δ – абсолютной деформации к l_0 – размеру деформируемого элемента: $\delta_{ОТН}=\Delta/l_0$. В общем случае, она обусловлена двумя составляющими различной физической природы $\delta_У$ – упругой и $\delta_{ПЛ}$ – пластической деформации. На практике [7] различают проявление этих видов деформаций путем контроля объемной $\delta(x,y,z)$ деформации, оценивая по изменению периодической закономерности ее поведения начало перехода от упругой к пластической деформации, характер ее развития и стадию деформации, начало процесса разрушения элемента. Для определения величины пластической деформации $\delta_{ПЛ}$ необходимо исключить влияние упругости, вычитая значение упругой составляющей деформации $\delta_У$ из полной продольной деформации Δ нагружаемого элемента

$$\delta_{ПЛ}= \Delta - \delta_У.$$

Относительные величины как упругой, так и пластической деформации элемента, особенно на начальном этапе возникновения последней, весьма малы: $<10^{-4}$.

Акустические средства дистанционного неразрушающего контроля состояния сред и параметров различных элементов за свою многолетнюю историю развития [5, 6] показали свою высокую надежность и эффективность для обнаружения зон разрушения структуры элемента. Достоинства акустических средств дистанционного неразрушающего контроля общеизвестны: относительная дешевизна; высокая устойчивость работы при любых погодных условиях, в отсутствии оптической видимости и наличия радиационных воздействий; простота обслуживания: длительный срок службы; невысокая масса; простота исполнения акустических элементов и т.п.

В настоящей работе проведен анализ современного состояния возможностей применения акустических приборов неразрушающего дистанционного контроля для определения начальной стадии развития изменения прочностных свойств материалов силовых элементов, ведущей к его отказу и разрушению в процессе дальнейшей эксплуатации.

В акустической измерительной технике для дистанционного контроля параметров среды разработан широкий спектр методов и устройств. Наиболее широкое применение для оценки характеристик состояния упругих и звукопоглощающих материалов и конструкций находят методы неразрушающего контроля с использованием ультразву-

кового интерферометра (объемного акустического резонатора) и локационные методы контроля расстояний (изменения пространственного положения лоцируемого элемента) [5, 6, 8, 9]. В последнем случае начальная стадия ослабления прочности силового элемента (объекта контроля) может быть обнаружена по изменению расстояния, как параметра оценки величины среднего значения деформации силового элемента при однонаправленной или циклической нагрузках.

В зависимости от способа формирования акустического сигнала, несущего информацию об объекте дистанционного контроля, структурные схемы формирования акустического сигнала можно представить четырьмя вариантами (рис. 1).

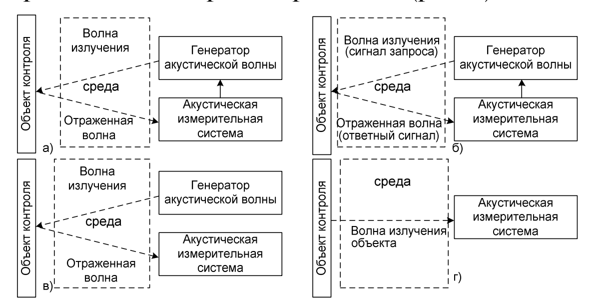


Рис. 1. *Схема формирования сигналов: а) активном, б) полуактивном, в) активном с активным ответом и г) пассивным методами акустической локации*

Активный метод контроля состояния объекта использует отраженный от объекта акустический сигнал, излученный источником акустической энергии, установленным в месте расположения измерительной системы. Акустический сигнал, излучаемый звуковым генератором акустической энергии, называется прямым или зондирующим, а сигнал, принимаемый приемником акустической энергии измерительной системы – отраженным (рис. 1). В процессе отражения от объекта падающей акустической волны ее параметры (амплитуда, фаза и др. составляющие) изменяются. В изменениях параметров отраженной акустической волны содержится информация о физических свойствах среды распространения, координатах (x,y,z) и скорости изменения положения объекта контроля $\upsilon(x,y,z,t)$, а также физических и геометрических характеристиках (размерах, конфигурации, свойствах материала и т.п.) объекта контроля. Достоинство активного метода формирования акустического сигнала состоит в том, что он позволяет получать информацию о состоянии объекта контроля, который сам не является источником акустического излучения или имеет низкую акустическую отражательную способность (большой коэффициент поглощения – звукопоглощающий материал). При этом, естественно, малая интенсивность акустического, отраженного объектом сигнала, ограничивает максимальную дальность действия измерительной системы.

При полуактивной схеме (рис. 1) информационным является сигнал от несвязанного с измерительной системой акустического источника объекта контроля или отраженный объектом сигнал от отдельного, не связанного с измерительной системой, акустического источника.

В случае активного с активным ответом метода акустического контроля состояния объекта используется сигнал, ретранслируемый акустическим источником, установленным на объекте контроля. Параметры ретранслируемого сигнала изменяются с учетом характеристик принятого сигнала и по закону передачи управляются сигналом запроса акустического генератора (рис. 1). То есть, принятый акустический сигнал переизлучается. Достоинство этого метода – увеличение дальности действия, улучшение соотношения сигнал – помеха (шум).

Пассивный метод акустического контроля состояния объекта состоит в контроле акустического сигнала, формируемого за счет деформационных изменений объектом контроля, или измерении сигнала естественного акустического фона окружающей среды, отраженного объектом. При этом дальность – расстояние до объекта не определяется, но по изменению параметров принимаемого сигнала относительно текущего состояния акустической фоновой обстановки можно выделить изменение состояния объекта контроля. Для определения изменения расстояния до поверхности объекта, контроля можно использовать угломерно-базовый триангуляционный метод с применением двухканальной измерительной системы в приближении геометрической оптики хода акустической волны.

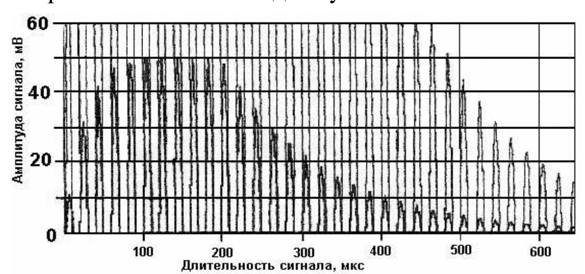


Рис. 2. *Типичный вид отраженного акустического сигнала прибора "ВЗЛЕТ УР"*

Отраженный к приемнику измерительной системы акустический сигнал $A_{OC}(x,y,z,\dot{X},\dot{Y},\dot{Z},t)$ несет информацию о координатах объекта и их производных во времени. Прием и обработка отраженного акустического сигнала, и оценка его параметров позволяет определить функционально связанные с ним величины, характеризующие состояние лоцируемого объекта. Отраженный от объекта сигнал на входе приемника акустического энергии $A_{OC}(t)$, типичный импульсный вид которого для приемника типа "ВЗЛЕТ УР" [9] представлен на рис. 2, может быть записан в виде

$$A_{OC}(t) = K_{OC} A_{O\Gamma}(t)\cos[\omega_з t - \varphi_{OC}(t) - \varphi_0],$$

где K_{OC} – коэффициент ослабления звуковой волны амплитуды $A_{O\Gamma}(t)$; $\omega_з=2\pi f_з$ – частота $f_з$ генератора; φ_0 и φ_{OC} – соответственно фаза начального и отраженного преградой сигнала. При локационном распространении звуковой волны длиной $\lambda_з$ фазовый

сдвиг $\Delta\Phi=\varphi_{OC}(t)-\varphi_0$, определяемый поступательным перемещением $\Delta l/\lambda_3$ (в угловых единицах длины волны), отражающей звук плоскостью силового элемента, равен удвоенному фазовому сдвигу:

$$\Delta\Phi=2\pi\Delta l/\lambda_3.$$

Отсюда видно, что деформация силового элемента вызывает изменение расстояния локационной трассы на величину Δl, приводящие к удвоенному изменению приращений фазового набега звуковой волны, излучаемой генератором. Коэффициент общего ослабления звуковой волны, отражаемой от плоской поверхности силового элемента и принимаемого акустическим приемником, определяется отношением принимаемой приемником к излученной генератором акустической энергии, с учетом $K_l(f_3,d,l,c)$ – коэффициента геометрического ослабления, имеющего вид [5]:

$$K_{OC}=e^{-2\alpha l}K_l(f_3,d,l,c).$$

Здесь α – коэффициент поглощения звука средой распространения и поверхностью отражения; l – расстояние (размер силового элемента); f_3 и c – частота и скорость звука; d – размер акустического излучателя.

Как видно из рис. 2, огибающая $A_{OC}(t)$ и фаза $\varphi_{OC}(t)$ сигнала являются медленно меняющимися функциями времени. Однако определить длину силового элемента l, оценивая амплитуду отраженного сигнала, затруднительно. Она зависит от многих факторов, действие которых не является постоянным. Амплитуда принимаемого акустическим приемником сигнала, отраженного от объекта контроля, является функцией диаграммы направленности (коэффициента усиления) акустического приемника, интенсивности акустического излучения генератора, величины затухания акустической волны на трассе контроля, геометрии и свойств материала силового элемента и т.п. Таким образом, хотя между амплитудой отраженного акустического сигнала, размерами и удалением, отражаемой звуковую волну, поверхности силового элемента существует [5] вполне определенная функциональная зависимость, использовать ее для определения величины деформации силового элемента в широком диапазоне затруднительно. Результаты исследования ультразвукового локационного уровнемера "ВЗЛЕТ УР" показывают, что относительная погрешность измерения перемещения, отражающей звуковую волну, поверхности локационным способом на базе ~10 м составляет $\pm 6\cdot 10^{-4}$, что явно недостаточно для выявления начальной стадии потери прочности силового элемента под нагрузкой. Интерферометрические методы и устройства акустического неразрушающего контроля используют для исследования тонкой структуры параметров распространения акустической волны (звука) в нестационарных средах, т.к. им присуще лучшее пространственное разрешение. При этом силовой элемент чаще всего трубчатой конструкции, может быть использован [8] как акустический интерферометр (рис. 3). Это решение в значительной степени упрощает практическую реализацию и получение достоверных результатов измерения при выполнении условий согласования геометрических размеров акустического интерферометра с параметрами звуковой волны для создания в трубе интерферометра стоячей звуковой волны. Большинство интерференционных методов измерений свойств зондируемой среды основано на определении изменения параметров стоячей волны. Этот подход позволяет [8] измерить коэффициент поглощения звука материалом контролируемого элемента, коэффициент отражения, входной импеданс, а также другие волновые параметры силового элемента привода. Наиболее часто применяют следующие методы измерения параметров: метод стоячей волны, метод передаточной функции, метод нелинейной регрессии [8].

Сущность контроля параметров по методу стоячей волны заключается в измерении амплитуд звукового давления в точках минимума P_{MIN} и максимума P_{MAX} стоячей волны и определение их координат на продольной оси акустического интерферометра (рис. 3).

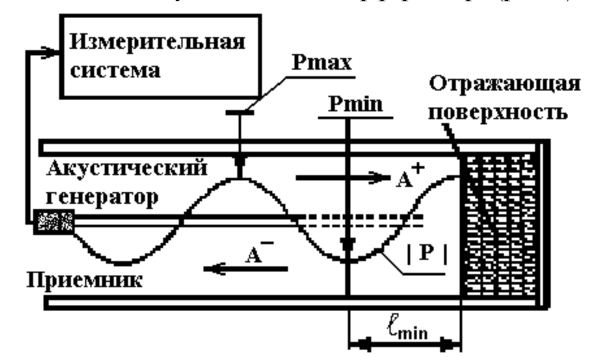


Рис. 3. *Формирование интерференционного акустического поля в силовом элементе привода перемещения*

Звуковое поле в интерферометре образуется за счет совместного взаимодействия падающей и отраженной гармонических составляющих акустических волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях вдоль оси трубчатого элемента. Квадрат модуля амплитуды звукового давления в трубе акустического интерферометра на расстоянии l_{MIN} от торца элемента, отражающего волну, имеет вид [8]:

$$|P|^2=|A^+|^2\left[\exp\left(\begin{array}{c}-2\beta\ell+\left(\dfrac{|A^-|}{|A^+|}\right)^2\exp(-2\beta\ell)+\\+2\left(\dfrac{|A^-|}{|A^+|}\right)\cos(2k\ell+(\varphi^--\varphi_0^+))\end{array}\right)\right],$$

где $|A^+|,|A^-|$ и φ_0^+,φ^- – амплитуды и фазы соответственно прямой и отраженной звуковых волн; $\kappa=2\pi f/c$ – волновое число; f – частота; c – скорость звука в трубе; l_{MIN} – расстояние (длина силового элемента) от излучателя до отражающей звук поверхности противоположного торца элемента; β – коэффициент затухания акустической волны который для случая цилиндрического интерферометра диаметром D определяется как [8]:

$$\beta=5{,}9\cdot10^{-5}\sqrt{f}/D \quad м\cdot с^{0,5}.$$

Пренебрегая затуханием ($\beta\to0$) для реальных размеров акустического интерферометра, выполненного на силовом элементе привода перемещений, фазовый набег в условиях малой деформации силового элемента определяется разностью:

$$\Delta\Phi=2\kappa(\Delta l),$$

где Δl – смещение отражающей поверхности торца за счет деформации силового элемента под нагрузкой. На практике этот метод осложнен трудоемкостью поиска положения минимума интерференции волн. Точность метода определяется погрешностью оценки положения минимума интерференции и зависит от размера линейного участка динамического диапазона измерений амплитуд акустического давления.

Измерение параметров акустической картины интерференции методом передаточной функции акустического интерферометра, выполненного на структуре силового элемента, основывается на использовании алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Метод передаточной функции повышает быстродействие измерений. Однако, точность метода является частотно зависимой – существенно падает на частотах генерации акустической волны, когда ее длина становится соизмеримой с удвоенным размером промежутка между выбранными для контроля точками измерений. Для исключения влияния этого фактора используется многоточечный метод контроля параметров акустической волны. Измерения проводят в N точках (N>2), расположенных эквидистантно по длине интерферометра с обработкой результатов измерения по методу наименьших квадратов. Использование данного метода обеспечивает большую точность фазовых измерений за счет увеличения времени обработки сигнала.

Способы контроля характеристик структуры звукового поля в акустическом интерферометре по методам трех точек и нелинейной регрессии дают [8] адекватные результаты. Численное решение функциональных зависимостей методом нелинейной регрессии с использованием стандартной процедуры GENFIT программного пакета *MathCad* 2001 и их аналитическое решение в диапазоне частот акустической генерации 0,4...4 кГц практически (погрешность 0,1 %) совпадают. Это означает, что основной недостаток – высокая чувствительность к погрешностям исходных данных, получаемых при измерении параметров акустического поля интерференции – по этому методу присущ и методу нелинейной регрессии.

Совместный анализ величин относительных погрешностей присущий рассмотренным выше методам контроля деформации силового элемента приводов перемещений способами акустической диагностики, позволяет разместить их в следующей последовательности, определяемой степенью влияния на конечный результат оценки деформации: влияние температуры (±50 °С) среды распространения акустического излучения ~10 %; влияние изменения относительной влажности 0...90 % среды ~1 %; изменения давления среды (~100 Па) – 0,01 %.

Исходя из этого, можно утверждать, что поскольку относительный вес погрешностей превышает величину 10^{-2}, то более незначительные по величине деформации $10^{-4}...10^{-5}$, свойственные этапу начала потери прочностных свойств материалом силового элемента под нагрузкой, не могут быть достоверно зарегистрированы рассмотренными выше методами. Методами акустической томографии (просвечивания) могут быть обнаружены явления уже развившейся "катастрофы" – потери прочности материалом (трещины и т.п.), физически нарушающие геометрический ход акустических лучей и вносящие изменения в структуру акустической волны, значительно превышающие по величине погрешности метода или соизмеримые с длиной акустической волны.

Анализ функциональных зависимостей временной задержки и фазового набега от параметров акустической волны и величины деформации силового элемента под нагрузкой приводит к следующему выводу: для контроля начальной стадии развития процесса потери прочности (рост упругой деформации, появление ползучести и т.п.) материалом силового элемента, независимо от метода оценки параметров необходим переход к использованию излучения с меньшей длиной волны, как носителя информации о деформации. Причем, для обеспечения малых ($\sim10^{-4}...10^{-5}$) величин погрешностей измерения разница между величиной контролируемой деформации и длиной волны излучения должна быть сравнима с порядком требуемой величины погрешности измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теребушко О.Н. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
2. Механика разрушения и прочность материалов / Под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1988. – 510 с.
3. Рассудов Л.Н., Мядзель В.Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
4. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин // Электричество. – 1999. – № 7. – С. 21–26.
5. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы и средства измерения расстояний в воздушной среде. – М.: Энергия, 1973. – 145 с.
6. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: Стандарты, 1982. – 178 с.
7. Советченко Б.Ф. Специальные главы прочности: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – 88 с.
8. Комкин А.И. Методы измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов // Измерительная техника. – 2003. – № 3. – С. 47–50.
9. Жмылев А.Б., Лисицинский Л.А., Топунов А.В. Испытания ультразвукового уровнемера "ВЗЛЕТ УР" // Измерительная техника. – 2003. – № 2. – С. 70–72.